转角二维异质结中的层间激子倍增

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41327.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

转角二维异质结中的层间激子倍增。 导读

突破光电器件的肖克利-奎伊瑟效率极限，是能源与信息领域的核心挑战之一。多重激子产生技术可利用单个光子产生多个电子-空穴对，从而提升器件量子效率，但其发展长期受限于高能量阈值和多激子超快复合两大难题。近日，香港理工大学李明杰教授与中国地质大学（武汉）杜桃园教授团队合作，在二维过渡金属硫化物异质结中取得重要突破。他们利用层间激子的独特性质，实现了接近理论极限的低阈值、高效率激子倍增，且倍增激子寿命长达纳秒级。该成果为解决多激子产生的核心挑战提供了全新方案，为高效光能转换打开了新大门。相关研究成果以Low-threshold interlayer exciton multiplication in twisted transition metal dichalcogenides heterobilayers，为题发表于《Light: Science Applications》。

研究背景

激子倍增是突破光电转换肖克利-奎伊瑟效率极限的重要机制，其理想过程为：吸收一个能量高于材料带隙的光子后，产生两个或更多电子-空穴对，从而将量子效率提升至100%以上。然而在传统体材料或量子点体系中，激子倍增通常需要入射光子能量达到材料带隙的4倍以上，且所产生的多激子寿命极短（皮秒量级），会迅速通过俄歇复合湮灭，因而难以被有效提取与利用。近年来，二维范德瓦尔斯异质结，特别是具有II型能带排列的体系，为实现新型激子倍增提供了重要平台。该类结构可形成空间分离的层间激子，具有寿命较长、电子与空穴在空间上分离等特征，并且其光电性质可通过层间扭转角进行灵活调控。尽管如此，如何在扭曲二维异质结中实现高效率、低能量阈值的单光子驱动层间激子倍增，并深入理解其微观光物理过程，仍然是该领域亟待突破的关键科学问题之一。

研究亮点

1.实现接近理论极限的低阈值倍增

团队以经典的MoS?/WSe?双层异质结为研究对象，通过精确控制层间扭转角，利用近红外荧光光谱及显微超快泵浦探测技术观测到清晰的层间激子倍增现象（图1a）。当激发光子能量大于2 eV时，层间激子发光效率及其电子和空穴量子产率同时大于100%（图1b-1c）。该过程的能量阈值可低至层间带隙的2倍，已逼近能量守恒允许的理论极限。尤为重要的是，即使在大扭转角导致动量严重失配的情况下，这一低阈值特性依然保持（图1c），打破了传统认知。

2. 兼具高效率与长寿命

在小扭转角样品中，层间激子倍增效率高达~90%。更为关键的是，倍增产生的多重层间激子具有纳秒量级的超长寿命（图1d），比以往报道的量子点或二维材料体系中的多激子寿命长1-2个数量级。长寿命为后续光电器件中的高效多激子提取及光电流倍增提供了根本保障。

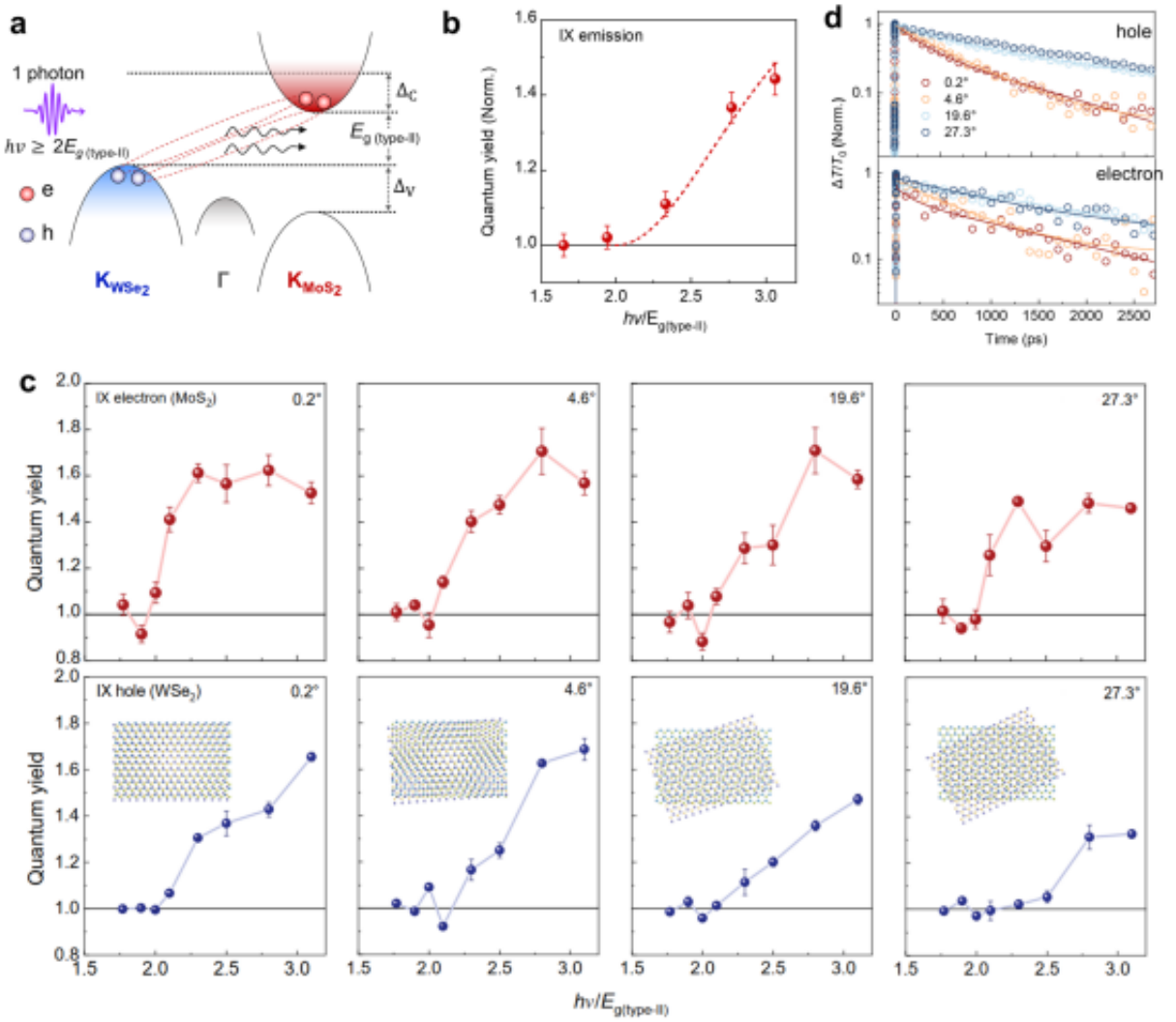


图1：(a) 双层间激子产生示意图；(b) 层间激子发光效率与泵浦光子能量的关系；(c) 提取的层间激子电子（上图）与空穴（下图）量子产率随泵浦光子能量（归一化至层间激子能量1 eV）的变化关系；(d) 层间激子态的扭转角依赖性：空穴（上图）与电子（下图）的复合动力学

3. 理论揭示全新物理机制

结合紧束缚模型与第一性原理计算，团队阐明了其独特机理：得益于II型异质结的能带补偿，光生热载流子本身具备充足的多余能量；通过高效的层间热载流子转移和声子辅助散射，可实现跨越层间带隙的冲击电离，从而驱动倍增（图2a-2b）。理论计算阐明了实验观测的低阈值和高效率趋势，并揭示了扭转角影响效率的库仑散射根源。

4. 观测到多层层间激子的长程吸引相互作用

通过瞬态吸收光谱，团队观测到单光子生成的多重层间激子之间存在长程吸引相互作用。当激发

能量超过倍增阈值时，电子与空穴态出现显著红移（图2c），这源于多个激子间的量子交换关联效应。分析表明，该相互作用的有效半径可达数个纳米（空穴~6 nm，电子~4 nm），远超异质双层厚度，属于长程偶极-偶极相互作用。有趣的是，相互作用距离与载流子倍增量子产率直接相关，产率越高，激子间距越小，吸引力越强。这一发现为理解和调控这类稳定的多激子量子体系提供了新视角。

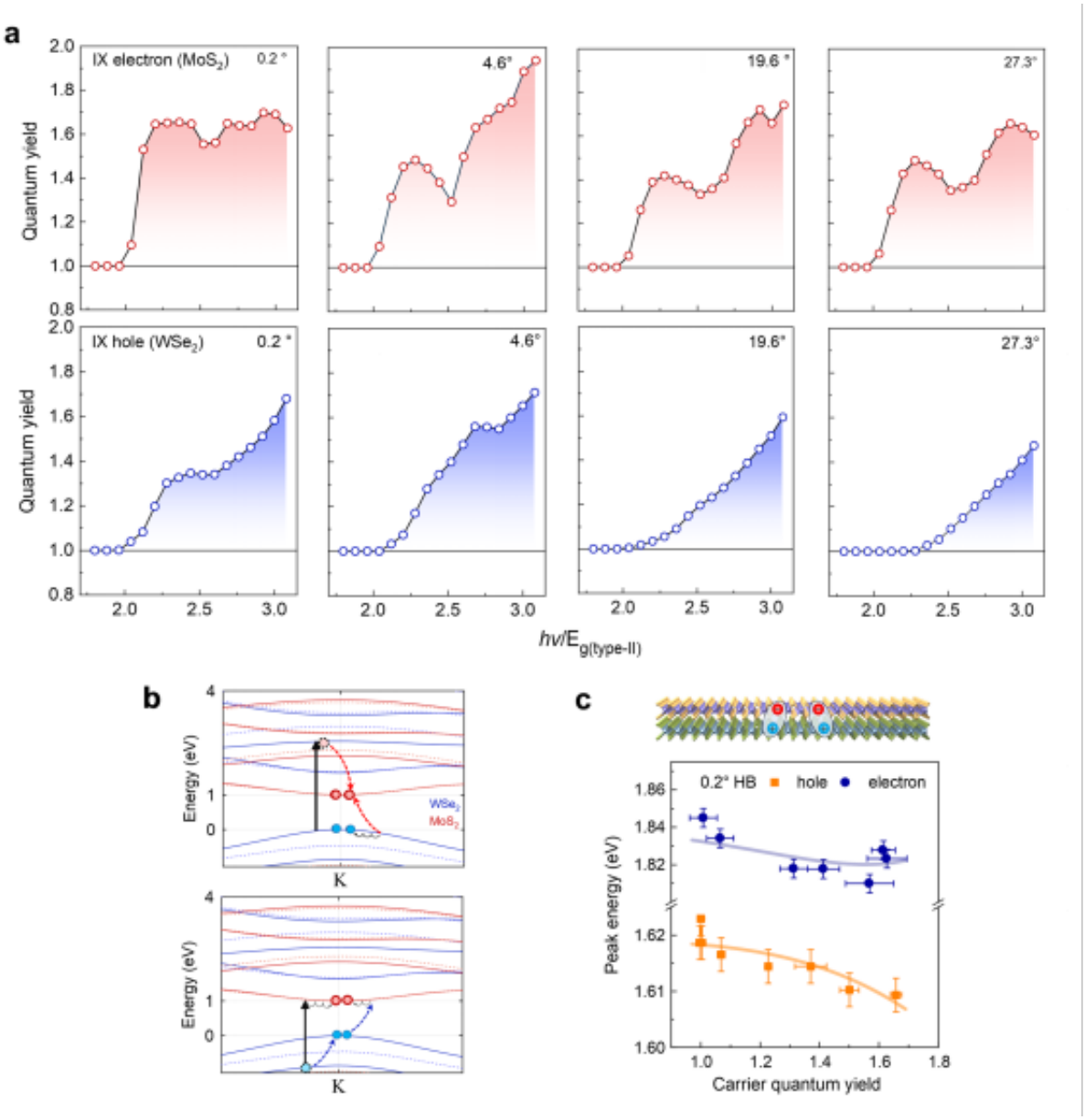


图2: (a) 紧束缚模型计算得到的层间激子中电子和空穴量子产率与激发光能量的关系；(b) 第一性原理计算得到的0.2 ° 异质双层能带结构，虚线箭头表示热载流子弛豫至能带极值点，从而能够通过碰撞电离跨越II型带隙实现载流子倍增；(c) 层间激子量子产率与峰值能量位置的关系，及其理论拟合曲线。插图：展示长程偶极-偶极相互作用的两个层间激子示意图

5. 成功演示光电流倍增器件

团队进一步将光学倍增效应转化为器件功能，制备了基于该异质结的自供电压光电二极管（图3a

）。实验直接观测到光电流量子效率在阈值以上超过100%，实现了光电流倍增（图3b），与理论计算结果匹配（图3c）。施加微小反向偏压可将阈值进一步降低，并显著提升器件响应度，证明了该机制在高效光电探测与光伏应用中的巨大潜力。

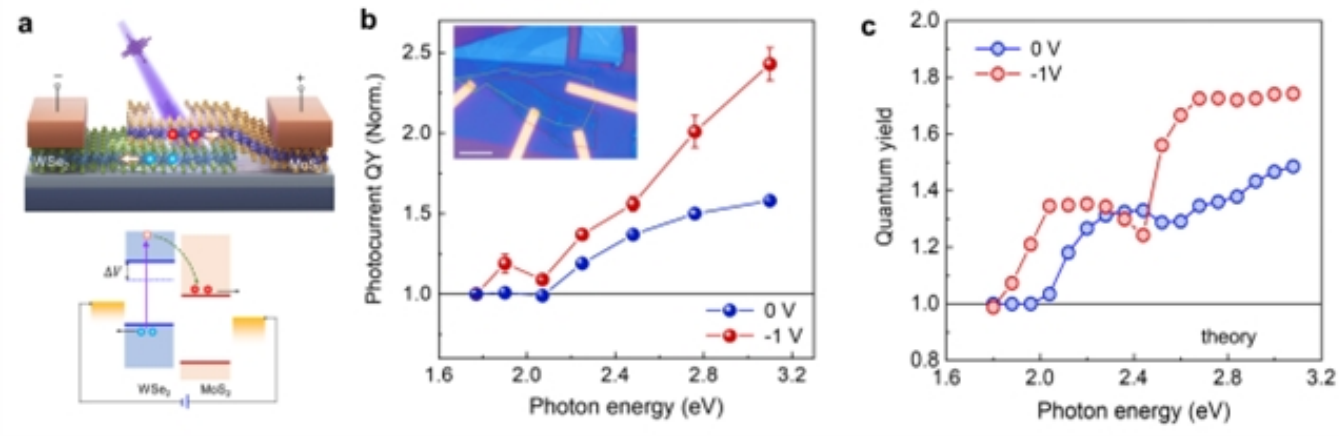


图3: (a)
器件结构示意图（上）及在施加偏压下的对应能带图（下），展示了层间激子倍增过程；(b) 在0 V和-1 V偏压下，实验测得的光电流量子产率随泵浦光子能量的变化关系。插图：异质双层器件的光学显微照片；(c)理论计算的光电流量子产率

总结与展望

本研究在二维扭曲异质结中发现了一种兼具低激发阈值、高转换效率和长激子寿命的层间激子倍增新机制，成功解决了该领域长期存在的关键难题，我们揭示了多重层间激子间的长程吸引相互作用，为理解二维异质结中的多体物理与激子相互作用提供了重要视角。该工作确立了一个全新的高性能激子倍增材料体系，为开发超越传统效率极限的高增益光电子器件开辟了切实可行的技术路径，同时展现出在探索新颖量子光学现象方面的潜在应用前景。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02193-w

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：李明杰等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发